جغرافیا و مخاطرات محیطی، شمارهٔ نهم، بهار ۱۳۹۳

صص ۱۲۳-۱۱۳

بررسی شاخص‌های ناپایداری هنگام وقوع پدیده‌های آب و هوایی مخرّب در مشهد

حسن صالحی[۱]- دانشجوی دکتری هواشناسی کشاورزی ، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

سید حسین ثنایی نژاد- دانشیار هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

محمد موسوی بایگی- استاد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۸/۲ تاریخ تصویب: ۱۳۹۳/۱/۲۶

چکیده

از جمله مخاطرات محیطی مهم می‌توان به پدیده‌های آب و هوایی مخرّب اشاره کرد که سالانه خسارات مالی و جانی بسیاری به بار می‌آورند. برای پیش‌بینی و مقابله با آثار زیانبار این پدیده‌ها، علاوه بر روش‌های همدیدی معمول، بررسی ساختار ترمودینامیکی جو در لایه‌های مختلف و تحلیل شاخص‌های ناپایداری ضروری است. در پیش‌بینی‌های عملی هواشناسی، شاخص‌های بسیاری برای ارزیابی پایداری اتمسفر و پیش‌بینی ناپایداری به‌کار می‌رود. تلاش‌های کمی برای بررسی این شاخص‌ها در ایران انجام شده و برای کالیبره کردن و معرفی آستانه‌ها، کاری انجام نشده است. در این مطالعه، سعی شده جمع‌بندی کاملی از حدود و آستانهٔ شاخص‌های ناپایداری برای پیش‌بینی انواع پدیده‌های مخرّب تهیه شود. بدین منظور، دقت مجموعه‌ای از پارامترها و شاخص‌ها، به طور ویژه برای مشهد محاسبه و بررسی شده است که عبارت‌اند از: شاخص شوالتر، شاخص مجموع مجموع‌ها و فشار سطح تعادل، آب قابل بارش، عدد ریچاردسون، شاخص صعود LI، شاخص K، SWEAT، CAPE و CIN. پدیده‌های آب و هوایی مخرّبی که در طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ در ایستگاه مشهد رخ داده، استخراج و در سه دسته برق، توفان تندری، تگرگ، دسته‌بندی و استفاده شده‌اند. روزهایی که این معیارها را نداشته‌اند، در دسته‌ای به نام بدون ناپایداری قرار گرفته‌اند. برای محاسبه مقادیر شاخص‌ها، از داده‌های جو بالای حاصل از ارسال رادیوسوند در ایستگاه مشهد استفاده شده است. این داده‌ها نسبت به وجود یا عدم پدیده‌های مخرّب تحلیل، و نتایج این تحلیل‌ها بصورت نمودارهای باکس پلات و نقاط پراکنده برای نمایش بصری روابط و آستانه‌ها، در پدیده‌های مختلف ارائه شده است. درنهایت آستانه هر شاخص برای پیش‌بینی انواع پدیده‌ها در مشهد معرفی شده، و ترکیب شاخص صعود (LI) و انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE) و همچنین شاخص صعود و سطح تعادل، به‌عنوان بهترین شاخص‌های ترکیبی معرفی شدند.

کلیدواژه‌ها: پدیده‌های مخرّب، پیش‌بینی، رادیوسوند، دینامیک جو، مشهد.

---

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۷۱۴۳۰۰۳۹ Email: Salehisarasyab@yahoo.com

۱. مقدمه

پدیده‌های زیان‌بخش جوّی همواره بر زندگی و فعالیت‌های بشری تأثیر داشته و هزاران سال است که انسان در جستجوی راه‌هایی برای تعدیل شرایط اقلیمی و جوی نامساعد و مبارزه با مخاطرات طبیعی بوده است. تلاش انسان برای کم کردن ابعاد وسیع خسارت‌زایی این پدیده‌ها، از به صدا درآوردن ناقوس کلیساها در قدیم، تا فعالیت‌های مکانیزهٔ امروزه تحت عنوان کلی *تعدیل آب و هوا*[1] یا بارورسازی ابرها، را شامل می‌شود. این پژوهش‌ها در طی سالیان تکامل یافته و از نتایج مهم آن‌ها تهیه و معرفی دیاگرام‌های ترمودینامیکی و شاخص‌های ناپایداری بوده است. این شاخص‌ها اعدادی هستند که بوسیله درج کردن (پلات کردن) مجموعه نقاط کشف شده از گزارش رادیوسوند ارسال شده به اعماق جو (سوندینگ)[2] روی نمودارهای ترمودینامیکی مانند اسکیوتی[3]، و ترسیم نمودار دما و نقطه شبنم به دست می‌آیند. شاخص‌های ناپایداری جهت بررسی ساختار قائم و چگونگی ناپایداری در جو بکار رفته، و مناسب بودن یا نبودن شرایط را برای تشکیل پدیده‌های مخرب نشان می‌دهند.

شوالتر ٤(۱۹۵۳: ۲۵۲)، شاخصی به نام خودش (شاخص شوالتر)[٤]، گالوی[٥](۱۹۵٦: ٥۲۹) شاخص صعود(LI)[6]، جرج (۱۹٦۰: ٥٤۷) شاخص K، میلر ۹(۱۹۷۲: ۱۰۲) شاخص خطر هوای مخرب (SWEAT)[۷] و شاخص مجموع مجموع‌ها (TT)[8]، میلر و مانکریف[۹](۱۹۷٦: ۳٥۰) شاخص جامع و بسیار با ارزش انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE)[۱۰] را معرفی کردند که نشان‌دهنده میزان شانس فعالیت توفان‌های تندری است. این شاخص‌ها برای پیش بینی همرفت یا پیش بینی مقدار بارش، متناسب با محل مورد بررسی تغییر می‌کنند و بهتر است که در هر منطقه با تحقیق و تجربه بدست آمده و کالیبره شوند. لذا در مناطق مختلف جهان توسط افرادی مانند هانتریزر[۱۱] و همکاران (۱۹۹۷) در سوییس و شمال کوههای آلپ، تامسون[۱۲](۱۹۹۸) بر روی شرق و غرب کوههای راکی، سیمونوف و گئورگیوف[۱۳](۲۰۰۱) در جنوب کوهستان رودوپس در شرق مدیترانه، کاستا[۱٤] و همکاران (۲۰۰۱) در شمال ایتالیا، لاپنتا[۱٥] و همکاران (۲۰۰۲) در منطقه شمال شرق ایالات متحده، منزاتو[۱٦] (۲۰۰۳) در منطقه‌ای از ونیز ایتالیا، سیوتاس و

1 Weather Modification
2 Sounding
3 Skew-T
4 Showalter Index (SI)
5 Galway
6 Lifted Index(LI)
7 Severe Weather Treat Index(SWEAT)
8 Total Total Index (TT)
9 Miller, and Moncrieff
10 Convective Available Potential Energy (CAPE)
11 Huntrieser
12 Thompson
13Simoenov, and Georgiev
14 Costa
15 LaPenta
16 Manzato

فلوکاس [1] (۲۰۰۳) در شمال یونان، هاکلاندر و فان دلدن[2](۲۰۰۳) برای هلند، کراس و سانتوز [3] (۲۰۰٤) در آلبرتا کانادا، کراون و بروکس[4](۲۰۰٤) در ٤۸ ایالت آمریکا، گروئن‌مَیر[5](۲۰۰۵) در شش ایستگاه جوبالای هلند، ماریناکی[6] و همکاران (۲۰۰٦) در چند منطقه یونان، دال[7](۲۰۰٦) بر روی آلمان، گوتلیب[8](۲۰۰۹) برای شمال شرق ایالات متحده، توسکی[9](۲۰۰۹) در اروپای مرکزی محاسبه و آزمون شده و در برخی موارد آستانه‌هایی برای پیش‌بینی برخی پدیده‌های هواشناختی معرفی شده است. در ایران نیز امینی و همکاران (۱۳۸۲: ۸۷) در منطقه اصفهان، عبدمنافی (۱۳۸۳: ۹۸) در تهران، صادقی حسینی و همکاران (۱۳۸٤: ۲۰ و ۱۳۸۵: ۹۲) در تهران و اصفهان، ثنایی‌نژاد و همکاران (۱۳۸۹: ۲۳٤) در مشهد، در مطالعاتی شاخص‌های ناپایداری را بررسی و آزمون کرده‌اند.

آستانه‌های ارائه شده در اغلب منابع علمی، مربوط به پدیده‌های هواشناختیِ کشورهای اروپایی و ایالات متحده آمریکا بوده که شرایط اقلیمی خاص آن مناطق، شاخص‌های ناپایداری مربوط به خود را دارد. معدود کارهای انجام شده در ایران نیز با استناد و مقایسه با همین آستانه‌ها نتیجه‌گیری شده که احتمال خطا در آن‌ها وجود دارد.

۲. منطقه مورد مطالعه

در این تحقیق، ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و جو بالای مشهد با ارتفاع ۹۹۹ متر از سطح دریا و طول جغرافیایی ' ۳۸ ° ۵۹ و عرض جغرافیایی ' ١٦ ° ۳٦ به عنوان محل برداشت داده و منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. جهت انجام این مطالعه، ناپایداری‌های شدیدی که طی دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ در ایستگاه سینوپتیک مشهد رخ داده و ثبت شده‌اند، استخراج و استفاده شده‌اند.

۳. مواد و روش‌ها

در این تحقیق، دقت چندین شاخص ناپایداری شامل انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی، شاخص شوالتر، شاخص صعود ((LI، شاخص KI) K)، آب قابل بارش، شاخص مجموع مجموع‌ها، شاخص خطر هوای مخرب (SWEAT)، شاخص بازدارندگی همرفتی، و عدد ریچاردسون، که برای تعیین و پیش‌بینی فعالیت‌های همرفتی بکار می‌روند، مورد بررسی و آزمون قرار گرفته است. بدین منظور، ناپایداری‌های شدید ثبت شده در ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و جو بالای مشهد استخراج، و استفاده شده‌اند. معیارهای هوای مخرّب شامل *بادهای با سرعت بیش از ۲۵ متربرثانیه (۵۰ نات)، انواع تگرگ، برق، رعد و برق (با یا بدون بارش)، اسکوال، ابرهای قیفی شکل و ترنادو* انتخاب

1 Sioutas, and Flocas
2 Haklander and Van Delden
3 Krauss, and Santos
4 Craven, and Brooks
5 Groenemeijer
6 Marinaki
7 Dahl
8 Gottlieb
9 Tuschy

شد. اگر در یک روز چند پدیده وجود داشت، پدیدهٔ با اهمیت بالاتر (کد بزرگ‌تر) به عنوان پدیده آن روز انتخاب شده است. پدیده‌های مخرّب استخراج شده، در سه دسته برق، توفان تندری، تگرگ، دسته بندی و استفاده شده‌اند. روزهایی که این معیارها را نداشته، و در واقع پدیدهٔ قابل توجهی نداشته‌اند، در دسته ای به نام *"بی‌پدیده (بدون پدیدهٔ مخرّب)"* قرار گرفته‌اند. سپس، اطلاعات جو بالای معادل این ناپایداری‌ها از پایگاه دپارتمان علوم جوی دانشگاه وایومینگ آمریکا گرفته شده‌اند. از گزارش‌های رادیوسوند مربوط به ناپایداری‌های ثبت شده در ایستگاه مشهد، ۳۱۵ مورد در آرشیو این پایگاه داده‌ای موجود بوده و استخراج شده است، که ۲۱۷ سوندینگ مربوط به ساعت صفر گرینویچ، و ۹۸ عدد در ساعت ۱۲ گرینویچ انجام شده‌اند. سوندینگ‌های مربوط به روزهای وقوع هوای مخرّب، جهت سهولت "*سوندینگ شدید*" نامیده شده‌اند. پس از بررسی گزارش‌های مربوط به ناپایداری‌ها، سوندینگ های شدید با توجه به نوع هوایی که تولید کرده‌اند، جداسازی شده و از مجموع سوندینگ‌های بی‌پدیده (بدون ناپایداری) نیز بطور تصادفی تعداد ۳۵۰ مورد، بررسی شده است. برای کنترل کیفی، همه سوندینگ‌ها بطور دستی بازبینی شده و سوندینگ‌های بدون CAPE برای ناپایداری‌های شدید کنار گذاشته شده‌اند، و همه شاخص‌ها با استفاده از تصحیح دمای مجازی محاسبه شده و بکار رفته‌اند (داسول و راسموسن، ۱۹۹٤: ٦۲٦).

سپس مقایسات و تحلیل‌های آماری لازم انجام شد. برای مقایسه داده‌ها و معرفی آستانه‌های هشدار وقوع انواع ناپایداری مختلف، از نمودارهای باکس پلات، و نمودار نقاط پراکنده استفاده شده است. کاربرد ترکیبی شاخص‌ها با همدیگر نیز برای پیش‌بینی رخدادهای مختلف بررسی شده است. اطلاعات آماری پایه برای شاخص‌ها در کل سوندینگ‌های شدید دوره آماری و نیز سوندینگ‌های بدون ناپایداری، استخراج و مقایسه‌هایی با آستانه شاخص‌ها در آمریکا (کراون و بروکس، ۲۰۰٤،۲۰ و گوتلیب، ۲۰۰۹: ۱۷) انجام گردید که نتایج آن ارائه می‌گردد.

٤. بحث و نتایج

در این مطالعه، سعی شده است جمع بندی کاملی از حدود و آستانهٔ پارامترها و شاخص‌های ناپایداری برای پیش‌بینی انواع ناپایداری‌ها در منطقه تهیه شود. بدین منظور، دقت شاخص‌ها با بررسی آماری تعداد زیادی از سوندینگ‌های انجام شده در ایستگاه جو بالای مشهد بررسی شده است.

ابتدا اطلاعات آماری اولیه سوندینگ‌ها استخراج شده و مقایسه‌ای نیز بین شاخص‌های بدست آمده از سوندینگ‌های شدید ساعت ۰۰ و ۱۲ گرینویچ انجام شده و نتایج آن در جدول (۱) آمده است که به خوبی اهمیت سوندینگ ساعت ۱۲ گرینویچ (حدود ۳,۵ عصر محلی) را نشان می‌دهد. در این جدول، در شاخص‌هایی که افزایش مقدار آن‌ها، نشان دهنده افزایش ناپایداری است، مقادیر میانه و میانگین نسبت به ساعت ۰۰، بالاتر بوده و به طور مشابه در شاخص‌هایی که ناپایداری با کاهش آن‌ها افزایش می‌یابد (مانند شاخص صعود و شاخص شوالتر)، مقادیر میانه و میانگین ساعت ۱۲ بسیار کم‌تر بوده است. فقط شاخص بازدارندگی همرفتی (CIN)، از بقیه مستثنی و در ساعت ۱۲

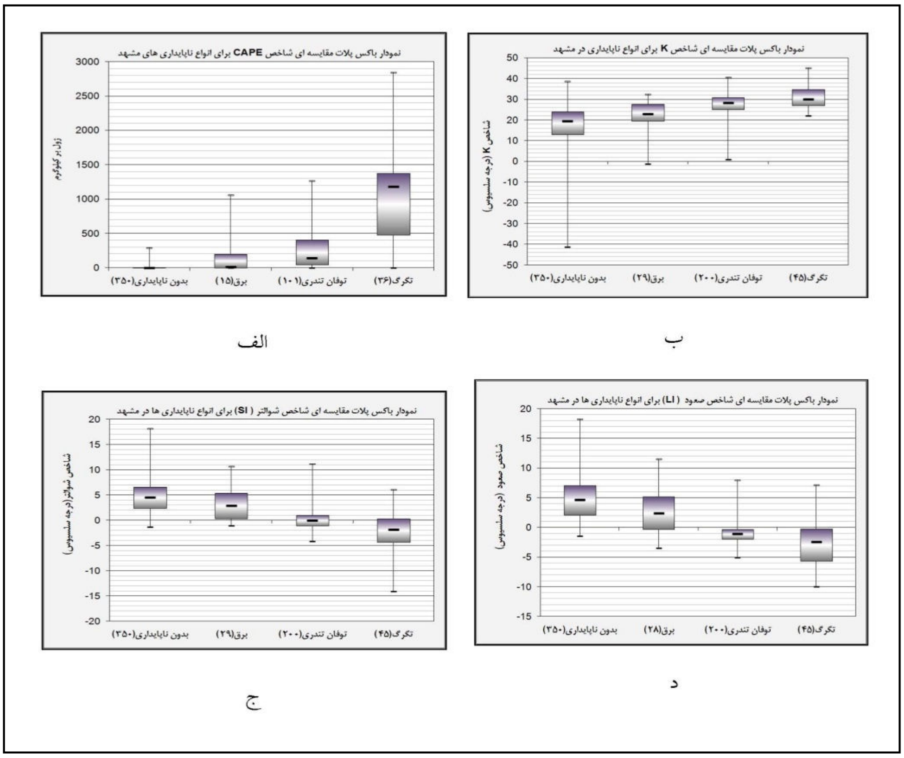
ضعیف‌تر است. این بدین معنی است که اکثر شاخص‌ها در ساعت ۱۲ نسبت به ساعت ۰۰ برای پیش‌بینی شرایط ناپایداری، وضعیت بسیار بهتری داشته‌اند و این اطلاعات با توجه به اینکه اغلب ناپایداری‌های منطقه مورد مطالعه در عصر اتفاق می‌افتد، در پیش‌بینی‌های آنی [1] و هشدارهای سریع انواع پدیده‌های مخرب می‌توانند سودمند واقع شوند. بنابراین، این نتایج نشان از اهمیت بالای سوندینگ ساعت ۱۲ بوده، و بر ضرورت انجام منظم آن تاکید می‌کند.

آستانه‌های چهار شاخص مهم برای دسته‌های مختلف ناپایداری بررسی، و نتایج آن بصورت نمودارهای باکس پلات ارائه شده است (شکل ۱). در این نمودارها همپوشانی باکس‌ها، معنی‌داریِ تفاوت آماری بین داده‌های شاخص‌ها را نشان می‌دهد. بر روی محور افقی این نمودارها، دسته‌های مختلف ناپایداری در مقایسه با یکدیگر و نیز در مقایسه با دسته بدون ناپایداری به همراه تعداد نمونه هر دسته به تفکیک آورده شده است. محور عمودی نمودارها نیز مقادیر شاخص‌ها را بیان می‌کند.

جدول ۱ مقایسه مشخصات آماری شاخص‌ها بین سوندینگ‌های شدید ساعت ۰۰ و ۱۲ گرینویچ در مشهد

شاخص	زمان	میانگین	میانه	انحراف معیار	بیشینه	کمینه
Showalter Index (°C)	00 UTC	0.99	0.64	3.50	11.17	-11.22
	12 UTC	-1.03	-0.76	2.81	7.63	-14.04
Lifted Index (Tv) (°C)	00 UTC	0.34	-0.36	3.51	11.52	-9.96
	12 UTC	-2.24	-2.08	2.70	8.00	-7.37
SWEAT	00 UTC	154.39	143.03	74.97	418.21	25.17
	12 UTC	201.36	200.50	92.52	426.20	53.00
K Index (°C)	00 UTC	25.52	25.90	7.36	41.99	-1.30
	12 UTC	29.92	29.70	5.34	45.20	13.30
Cross Totals (°C)	00 UTC	19.90	19.90	4.09	33.90	7.50
	12 UTC	19.95	20.10	4.27	33.20	11.30
Vertical Totals (°C)	00 UTC	28.99	29.10	3.29	38.30	19.10
	12 UTC	32.27	32.50	3.34	39.10	22.40
Total Totals (°C)	00 UTC	48.89	49.20	5.60	72.20	32.20
	12 UTC	52.22	51.60	4.04	66.70	44.50
CAPE (Tv) (J kg^{-1})	00 UTC	165.70	59.16	268.64	1527.59	0.00
	12 UTC	564.02	369.32	542.53	2842.86	0.00
CIN (Tv) (J kg^{-1})	00 UTC	-209.66	-192.16	178.12	0.00	-633.30
	12 UTC	-72.10	-46.81	75.66	0.00	-352.12
EL Pressure(Tv) (hPa)	00 UTC	385.63	370.47	115.66	757.26	165.77
	12 UTC	311.32	284.29	87.80	586.72	197.87
BRN(Tv)	00 UTC	8.27	0.88	26.50	194.28	0.00
	12 UTC	13.78	8.39	18.96	106.08	0.00
Precipitable Water (mm)	00 UTC	19.82	18.98	5.51	33.52	7.58
	12 UTC	20.63	20.44	5.09	34.27	7.83

1 Nowcasting



شکل ۱ مقایسه شاخص‌های مختلف در سوندینگ‌های شدید و بدون ناپایداری در دوره آماری مشهد؛ تعداد سوندینگ مورد استفاده هر دسته در پرانتز آورده شده است.

از روی نمودار شکل (۱– الف) می‌توان قدرت جداسازی و پیش‌بینی انواع ناپایداری‌ها و ارتباط شاخص انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی را با وقوع رخدادهای مختلف مشاهده و تحلیل کرد. در دسته تگرگ، مقدار میانه این شاخص بیشتر از ۱۱۸۰ ژول برکیلوگرم بوده و ۷۵ درصد از همه رخدادهای تگرگ، مقدار CAPE بیش از ۴۷۰ ژول برکیلوگرم، و ۲۵ درصد آن‌ها بیش از ۱۳۷۵ ژول برکیلوگرم انرژی دارند. عدم همپوشانی باکس‌های توفان تندری و تگرگ، توانایی این شاخص در جداسازی این پدیده‌ها را نشان می‌دهد. از این نمودار می‌توان مقدار ۱۴۰ ژول برکیلوگرم شاخص CAPE را بعنوان آستانه پایین وقوع توفان‌های تندری، و نیز مقدار ۴۷۵ ژول برکیلوگرم را به عنوان آستانه پایین برای وقوع پدیده تگرگ در مشهد معین کرد. همچنین می‌توان گفت که این شاخص به تنهایی قادر به جداسازی کامل موارد برق و توفان تندری نمی‌باشد.

شاخص K امکان وقوع ناپایداری را بر پایهٔ آهنگ کاهش دما، محتوی رطوبتی لایه‌های زیرین جو و گسترش قائم لایهٔ مرطوب اندازه‌گیری می‌کند و براساس درجه سلسیوس بیان می‌شود. هر چه این شاخص بیشتر باشد، بر شدت ناپایداری افزوده می‌شود که این موضوع در نمودار نیز دیده می‌شود (شکل ۱– ب). می‌توان گفت که مقادیر زیر ۲۰ درجه این شاخص ناپایداری ایجاد نمی‌کند. مقدار این شاخص در نیمی از داده‌های برق (میانه)، بالای ۲۳ درجه، و در ۷۵ درصد دسته تگرگ بالای ۲۷ درجه بوده، و میانه دسته تگرگ نیز بالای ۳۰ درجه می‌باشد. دسته

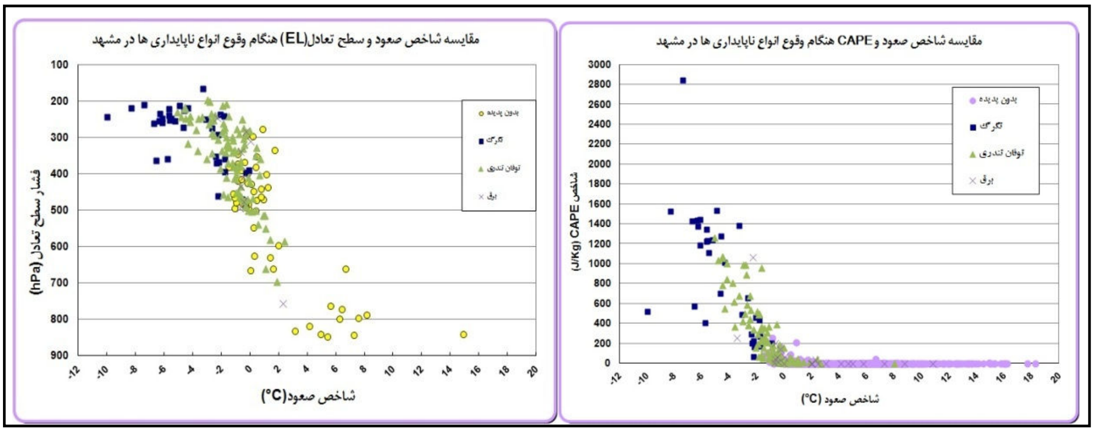
توفان تندری میانه بالای ۲۸ درجه دارند و چارک اول آن‌ها بالای ۲۵ درجه است. بنابراین از این نمودار می‌توان چنین نتیجه گرفت که مقدار ۲٤ درجه شاخص K، بعنوان آستانه پایین وقوع پدیده برق، و مقدار ۲۸ درجه برای وقوع توفان‌های تندری و مقدار ۳۰ درجه برای پدیده تگرگ در مشهد مناسب به نظر می‌رسند. که این نتایج، با نتایجی که گوتلیب برای شمال شرق و دشت‌های میانی آمریکا بدست آورد، سازگاری خوبی دارد.

شاخص شوالتر نیز برحسب درجه سلسیوس بیان می‌شود و هرچه منفی‌تر باشد، بر شدت ناپایداری جو افزوده می‌شود (شکل ۱– ج). می‌توان گفت که در مقادیر بیش از ۵ درجه این شاخص، آرامش بر جو منطقه حاکم است. مقادیر این شاخص برای پدیده‌های برق و حالت‌های بدون ناپایداری، همپوشانی زیادی دارند. دسته توفان تندری میانه زیر صفر درجه دارند و چارک سوم آن‌ها زیر یک درجه است. در ۷۵ درصد از دسته تگرگ، مقدار این شاخص زیر صفر درجه بوده، و میانه این دسته نیز زیر ۲– درجه می‌باشد. بنابراین می‌توان آستانه ۲ درجه را بعنوان آستانه بالای شاخص شوالتر در وقوع پدیده برق، و نیز مقدار صفر درجه را به عنوان آستانه بالای وقوع توفان‌های تندری، و مقدار ۲– درجه را برای پدیده تگرگ در مشهد نتیجه گرفت.

هرچه شاخص صعود منفی‌تر باشد، صعود بسته هوا بیشتر شده، و در نتیجه بر شدت ناپایداری جو افزوده می‌شود، که این موضوع در این مطالعه نیز اثبات شده است (شکل ۱– د). در دسته بدون ناپایداری، اغلب مشخصات آماری این شاخص بالای صفر بوده است. هرچند که میانه دسته برق نسبت به دسته بدون ناپایداری، بیش از ۲ واحد کاهش نشان می‌دهد، باکس‌های این دو دسته همپوشانی زیادی دارند و این شاخص به خوبی قادر به جداسازی این دو دسته نمی‌باشد. در دو دسته برق و توفان‌های تندری همپوشانی وجود ندارد و این شاخص برخلاف شاخص CAPE قدرت خوبی در جداسازی این دو پدیده دارد. بنابراین می‌توان گفت که کاربرد ترکیبی این شاخص‌ها هنگام پیش‌بینی کاربردی نتیجه بهتری خواهد داد. براساس این نمودار می‌توان چنین نتیجه گرفت که هنگام وجود شاخص صعود مثبت نیز، احتمال وقوع ناپایداری شدید در منطقه زیاد است. این نتیجه جالب توجه و قدری شگفت آور است زیرا در بیشتر منابع و حتی توسط پیش‌بین‌ها برای اغلب نقاط از LI کم‌تر از صفر به عنوان آستانه استفاده می‌کنند (گوتلیب، ۲۰۰۹: ۱۷). درنهایت شاخص صعود ۱– درجه سلسیوس را می‌توان به عنوان آستانه بالا برای وقوع توفان تندری، و مقدار ۲,۵– درجه سلسیوس را می‌توان به عنوان آستانه بالا برای وقوع تگرگ بکار برد.

ترکیب شاخص‌های مختلف ناپایداری نیز با یکدیگر بررسی و نمودارهای نقاط پراکنده[1]، برای تجسم رابطه بین دو شاخص مختلف، و نشان دادن همزمان تفاوت‌های این دو شاخص در انواع ناپایداری‌ها بکار رفت. پس از بررسی این نمودارها برای شاخص‌های مختلف، شاخص صعود (LI) و انرژی پتانسیل در دسترس همرفتی (CAPE)، و همچنین شاخص صعود و سطح تعادل، رابطه بسیار خوبی با هم نشان دادند که در اغلب موارد، نتایج با یافته‌های گوتلیب، ۲۰۰۹ مطابقت دارد (شکل ۲).

1 Scatter plots



شکل ۲ رابطه شاخص صعود با سطح تعادل (راست) و شاخص شاخص صعود با CAPE (چپ) هنگام وقوع ناپایداری‌های مختلف در مشهد

۵. نتیجه‌گیری

با بررسی و تحلیل مجموعه داده‌ای از سوندینگ‌های انجام شده در ایستگاه مشهد، در دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۹ دریافتیم که استفاده از شاخص‌های ناپایداری، کارایی بسیار خوبی در پیش‌بینی و هشدار وقوع انواع ناپایداری‌های شدید در منطقه داشته و می‌تواند به‌عنوان یک روش تکمیلی قوی در کنار دیگر روش‌های پیش‌بینی به‌کار رود. در این مطالعه، سوندینگ ساعت ۱۲ نسبت به ساعت ۰۰ برای پیش‌بینی شرایط ناپایداری، وضعیت بسیار بهتری نشان داده است. همچنین آستانه‌هایی برای شاخص‌های مختلف جهت هشدار وقوع انواع ناپایداری‌ها در مشهد بدست آمده که در جدول (۲)، خلاصه‌شده است. برای شاخص‌های عدد ریچاردسون (BRN)، بازدارندگی همرفتی (CIN)، و ضخامت (تیکنس) نتایج مطلوبی گرفته نشده و این شاخص‌ها برای استناد جهت پیش‌بینی یا هشدار وقوع ناپایداری در منطقه مناسب دیده نشده‌اند. کاربرد این شاخص‌ها هریک به تنهایی به عنوان پارامتر پیش‌بینی اشتباه بوده و لازم است که همه این شاخص‌ها در ترکیب با هم و در کنار روش‌های سینوپتیکی پیش‌بینی و نیز با استفاده از سایر پارامترهای جوی مانند الگوهای فشاری و باد در سطوح مختلف، نوع و مقدار ابرناکی، میزان رطوبت، سرعت حرکت توده‌های هوا، و غیره مورد استفاده قرار گیرند. پیشنهاد می‌شود بانک اطلاعاتی جامعی از ناپایداری‌های شدید اتفاق افتاده در سراسر کشور و منطقه تهیه، و انواع شاخص‌ها و پارامترهای حاصل از ارسال رادیوسوند محاسبه، و پایگاه داده‌ای دقیق و منظمی از اطلاعات جو بالا تهیه گردد.

جدول ۲ جمع بندی آستانه‌های بدست آمده برای شاخص‌های مختلف برای هشدار وقوع انواع ناپایداری در مشهد؛ علامت کم‌تر یا بیشتر، به ترتیب پایین یا بالا بودن آستانه‌ها را معین می‌کند

نام شاخص و یکای مربوط	آستانه هشدار برق	آستانه هشدار توفان‌تندری	آستانه هشدار
شاخص (CAPE) ژول برکیلوگرم	-	$140 J/Kg <$	$475 J/Kg <$
شاخص (SWEAT)	-	$150<$	$200<$
شاخص شوالتر SI(°C)	$<+2°C$	$<0°C$	$<-2°C$
شاخص صعود LI(°C)	$<+2°C$	$<-1°C$	$<-2.5°C$
شاخص K KI(°C)	$24°C<$	$28°C<$	$30°C<$
شاخص مجموع‌ها TT(°C)	$46°C<$	$48°C<$	$50°C<$
فشار سطح LCL P_{LCL} (hPa)	-	-	$775 hPa<$
دمای سطح LCL T_{LCL} (°K)	$276°K<$	$278°K<$	$280°K<$
سطح (LFC) هکتوپاسکال	-	$610 hPa<$	$640 hPa<$
سطح تعادل (EL) هکتوپاسکال	$<400 hPa$	$<340 hPa$	$<280 hPa$
نسبت آمیزه میانگین لایه مخلوط	$6 g/Kg <$	$8 g/Kg <$	$9 g/Kg <$

کتابنامه

امینی، ل؛ ۱۳۷۹ . بررسی انرژی پتانسیل در دسترس در یک سیستم همرفتی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی نور. به راهنمایی هوشنگ قائمی.

امیدوار، کمال، و همکاران؛ ۱۳۹۲. واکاوی ترمودینامیکی بارشهای سنگین ناشی از پدیده سردچال در نواحی مرکزی و جنوب غرب ایران (مطالعه موردی: رخداد بارش ۱۱ آذر ۱۳۸۷)؛ جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۵: صص ۱– ۱۹.

ثنایی‌نژاد، ح؛ صالحی، ح؛ بابائیان؛ ۱۳۸۹. تحلیل سینوپتیکی و دینامیکی پدیده‌های همرفتی محلی به منظور بهبود پیش‌بینی آن‌ها. چهاردهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران اردیبهشت ۸۹ صص ۲۳۴–۲۳۷.

صادقی حسینی، ع؛ رضائیان، م؛ ۱۳۸۵. بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان؛ مجلهٔ فیزیک زمین و فضا، ۳۲ (۲): ۸۳ تا ۹۸.

عبدمنافی، د؛ ۱۳۸۳. بررسی شاخص‌های ناپایداری، برش قائم باد و وضعیت‌های رطوبتی در هنگام نزول تگرگ در تهران. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد واحد تهران شمال. به راهنمایی حسن عسکری شیرازی و مشاوره حسن خالقی زواره.

Abdemanafi, D., 2002. Analysis of instability indices, vertical wind shear and humidity conditions during hail in Tehran. M.Sc. Thesis, Islamic Azad University of Tehran shomal. Supervisor: H., Askari Shirazi.

Amini, L., 2000. Analysis of available potential energy in a convective system, M.Sc. Thesis, Tarbiat Modares University. Supervisor: H., Ghaemi.

Costa, S., Mezzasalam, P., Levizzani, V., Alberoni, P., and Nanni, S., 2001. Deep convection over Northern Italy: synoptic and thermodynamic analysis. Atmospheric Research 56, 73- 88

Craven, J.P., H.E. Brooks, 2004. Baseline Climatology of Sounding Derived Parameters Associated with Deep, Moist Convection. National Weather Digest, 28: 13-24.

Dahl, J. M. L., 2006. Supercells, Their Dynamics and Prediction. M.sc. Thesis, Institute of Meteorology, Free University of Berlin, Germany.

Galway, J. G., 1956. The lifted index as a predictor of latent instability. Bulletin of the American Meteorological Society 37, 528–529.

Gottlieb, R. J., 2009. Analysis of Stability Indices for Severe Thunderstorms in the Northeastern United States. M.Sc. Thesis, Cornell University, Ithaca, USA

Groenemeijer, P., 2005. Sounding-derived parameters associated with severe convective storms in the Netherlands. M.Sc. thesis, Institute of Marine and Atmospheric research Utrecht (IMAU), The Netherlands

Haklander, A. J., A. Van Delden, 2003. Thunderstorm predictors and their forecast skill for the Netherlands. Atmospheric Research 67-68: 273-299.

Huntrieser, H., H.H. Schiesser, W. Schmid, and A. Waldvogel, 1997. Comparison of traditional and newly developed thunderstorm indices for Switzerland. Weather Forecasting 12, 108-125.

Krauss, T. W., Santos, J. R., 2004. exploratory analysis of the effect of hail suppression operations on precipitation in Alberta: Atmospheric Research, 71, 35-50.

LaPenta, K.D., G.J. Malagras, J.W. Center, S.A. Munafo, and C.J. Alonge, 2002. An updated look at some severe weather forecast parameters. Eastern Region Technical Attachment No. 1.

Manzato, A., and Morgan Jr. G., 2003. Evaluating the sounding instability with the lifted parcel theory: Atmospheric Research 67-68, 455-473.

Marinaki, A., M. Spiliotopoulos, and H. Michalopoulou, 2006. Evaluation of Atmospheric Instability Indices in Greece. Advances in Geosciences 7, 131–135.

Moncrieff, M.W. M.J. Miller, 1976. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. Royal Meteorological Society 102: 373-394.

Sadeghi Hosseini, A., Rezaeian, M., 2004. Analysis of some instability indices and convective cloud seeding potential in Isfahan. Earth and space physics. 32(2): pp 83-98.

SanaeiNejad, H., Salehi, H., Babaeian, I., 2009. Dynamic and Synoptic Analysis of convective local phenomena. 14th Geophysics Conference of Iran. Tehran. pp 234-237.

Showalter, A. K., 1953. A stability index for thunderstorm forecasting. Bulletin of the American Meteorological Society 34: 250-252.

Simoenov, P., and Georgiev, C. G., 2001. A case study of tornado-producing storm south of Rhodopes Mountain in the Eastern Mediterranean: Atmospheric Research, 57: 187-199.

Sioutas, M. V. and Flocas, H. A., 2003. Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment. Theoretical and Applied Climatology 75: 189–202.

Thompson, R. L., R. Edwards, J. A. Hart, K. L. Elmore, and P. Markowski, 2003. Close proximity soundings within supercell environments obtained from the Rapid Update Cycle. Weather Forecasting 18: 1243-1261.

Tuschy, H., 2009. Examination of severe thunderstorm outbreaks in Central Europe. M.sc. Thesis, University of Innsbruck, Austria.